Pêches et Océans Canada | Fisheries and Oceans Canada
Sciences des écosystèmes et des océans | Ecosystems and Oceans Science

Secrétariat canadien de consultation scientifique
Région du Centre et de l'Arctique | Avis scientifique 2015/051

AQUACULTURE EN CAGE EN EAU DOUCE : IMPACTS ÉCOSYSTÉMIQUES DES DÉCHETS DE PHOSPHORE DISSOUS ET SOUS FORME DE PARTICULES

*Figure 1. Une installation d'aquaculture en cage en eau douce pour l'élevage de la truite arc-en-ciel (*Oncorhynchus mykiss *Walbaum). (photo : Cynthia A. Wlasichuk, 2012)*

Contexte :

La compréhension des répercussions environnementales potentielles du phosphore (P) émanant des activités aquacoles en eau douce suscite l'intérêt de l'industrie et présente un intérêt public. Par conséquent, la Direction générale de la gestion de l'aquaculture de Pêches et Océans Canada a demandé un avis scientifique sur les risques que présentent les rejets de déchets de phosphore dissous et sous forme de particules issus des activités d'aquaculture en cage en eau douce pour les écosystèmes lacustres d'eau douce. Bien que les installations d'aquaculture en cage en eau douce soient susceptibles de poser d'autres problèmes (p. ex. l'enrichissement organique et en autres éléments nutritifs, la modification de l'habitat, les interactions génétiques et écologiques avec les populations de poissons sauvages), la présente évaluation était axée sur le phosphore. L'évaluation comprend un examen des publications scientifiques actuelles sur le phosphore dans les environnements d'eau douce (cycle et devenir), ainsi que des données sur l'aquaculture en eau douce, et notamment sur l'assimilation du phosphore et son rejet par les activités aquacoles d'élevage de la truite arc-en-ciel. Bien que la réaction de l'écosystème à la charge en polluants phosphorés venant s'ajouter sous forme de déchets aquacoles ne soit pas bien comprise, cet examen vise à recueillir, évaluer et synthétiser les renseignements disponibles. La présente évaluation porte principalement sur l'industrie existante du lac Huron (Ontario), *de la Saskatchewan et de la Colombie-Britannique, ainsi que sur les activités menées dans la région des lacs expérimentaux. Il s'agit du premier avis du Secrétariat canadien de consultation scientifique (SCCS) portant spécifiquement sur l'aquaculture en cage en eau douce.*

Le présent avis scientifique découle de la réunion régionale d'examen par des pairs qui s'est déroulée du 17 au 19 juin 2014 et intitulée Aquaculture en cage en eau douce : impacts écosystémiques des déchets de phosphore dissous et sous forme de particules. Toute autre publication découlant de cette réunion sera publiée, lorsqu'elle sera disponible, sur le calendrier des avis scientifiques de Pêches et Océans Canada (MPO).

Décembre 2015

Canada

SOMMAIRE

- Le phosphore (P) a une importance biologique et est d'origine naturelle ainsi qu'anthropique. Le phosphore est naturellement présent à des concentrations faibles, mais variables dans les plans d'eau et tend à limiter la croissance de la production primaire. La concentration de phosphore dans les lacs est étroitement liée aux changements de productivité des lacs et à la qualité de l'eau. La modification anthropique de la charge en polluants phosphorés d'un écosystème lacustre doit par conséquent être prise en compte dans le processus de gestion des activités susceptibles de contribuer à la charge totale en polluants phosphorés.
- Afin de prévoir précisément et de gérer les effets potentiels des apports en phosphore provenant de l'aquaculture dans les écosystèmes lacustres, il est nécessaire de mieux comprendre les facteurs qui influent sur le cycle du phosphore en fonction de chaque écosystème. Des travaux supplémentaires doivent notamment être menés pour comprendre les facteurs qui ont une incidence sur le rejet et la rétention du phosphore, et pour comprendre comment la structure du réseau trophique peut influer sur le cycle du phosphore entre la colonne d'eau et les sédiments.
- L'introduction d'espèces envahissantes et la modification de l'utilisation du paysage sont susceptibles d'avoir des répercussions sur le cycle du phosphore d'un écosystème lacustre. La modification de l'utilisation du paysage peut modifier considérablement non seulement la charge totale en polluants phosphorés, mais également le rapport entre phosphore dissous et phosphore sous forme de particules. Par conséquent, il est impératif de mettre en place dans les écosystèmes gérés pour accueillir des activités aquacoles une surveillance continue de la charge en polluants phosphorés des bassins hydrographiques et de la modification de la structure trophique des plans d'eau, afin de comprendre les charges totales en polluants phosphorés.
- L'excrétion de phosphore par les poissons d'aquaculture est directement liée à la quantité de phosphore dans le régime alimentaire et à sa digestibilité.
- La charge en polluants phosphorés due à l'aquaculture peut être limitée au maximum grâce à l'utilisation d'aliments contenant du phosphore hautement assimilable et en faible quantité.
- La modélisation nutritionnelle des aliments et les données d'élevage fournissent une estimation précise de la contribution du phosphore qui n'est pas quantifiable en échantillonnant l'eau réceptrice, en raison de la dispersion, de la décantation et des transformations rapides des déchets phosphorés une fois introduits dans l'environnement.
- La gestion des effets potentiels des apports en phosphore liés à l'aquaculture dans les écosystèmes lacustres pourrait être améliorée en utilisant la modélisation nutritionnelle pour caractériser la quantité, la forme et le chronométrage de la charge en polluants phosphorés.
- La charge totale en phosphore produite par les élevages ne représente pas une mesure exacte du risque d'eutrophisation potentiel posé par l'apport en phosphore dans un écosystème. Le chronométrage et le devenir de la charge en polluants phosphorés peuvent avoir une influence considérable sur ce risque.
- Des différences de limnologie, de géochimie et de structure trophique propres à un écosystème peuvent modifier le cycle du phosphore. Il est donc nécessaire de mener des recherches scientifiques supplémentaires pour déterminer le devenir du phosphore provenant de l'aquaculture dans les écosystèmes accueillant des activités commerciales d'élevage en cages.
- Le faible niveau de surveillance des apports en phosphore des affluents constitue une source importante d'incertitude au moment d'estimer les charges totales en polluants phosphorés du chenal du Nord du lac Huron. Il est impératif d'améliorer considérablement la surveillance spatiale des sources en phosphore des écosystèmes gérés destinés à accueillir des activités aquacoles.

L'estimation précise de la charge en polluants phosphorés est nécessaire pour déterminer les bilans de phosphore.

- La variabilité naturelle des précipitations annuelles peut avoir une incidence considérable sur la charge en polluants phosphorés des bassins versants alimentant les écosystèmes lacustres. Il serait souhaitable de gérer l'ensemble des charges anthropiques en polluants phosphorés de manière à tenir compte de la variation naturelle de la charge des bassins versants, tout en empêchant la détérioration de la qualité de l'eau.
- Bien que l'industrie aquacole contribue actuellement à seulement 5 % environ de la charge en polluants phosphorés du chenal du Nord du lac Huron, l'importance biologique du phosphore pour la productivité lacustre et la nécessité de satisfaire aux charges en polluants phosphorés cibles de la Commission mixte internationale (CMI) laissent entendre que la charge en polluants phosphorés doit être prise en considération dans la gestion de l'expansion prévue de l'industrie ou d'autres activités dont la contribution à la charge en polluants phosphorés est reconnue.
- L'établissement de charges cibles en polluants phosphorés pourrait être amélioré si les réactions sublittorales et extracôtières à ces charges étaient prises en compte, et si le type des charges, c'est-à-dire si elles prennent la forme de particules ou de phosphore dissous, était pris en considération. L'établissement de seuils de charges distincts pour les zones sublittorales et extracôtières, ainsi que pour le phosphore dissous et sous forme de particules permettrait d'améliorer la gestion de l'écosystème du chenal du Nord.
- La mise en place d'une stratégie de gestion des bassins versants qui tiendrait compte non seulement de l'aquaculture, mais également d'autres activités au sein des bassins versants et de leur contribution potentielle aux charges en polluants phosphorés, serait bénéfique pour tous les intervenants.
- Une grande partie des déchets de phosphore (dissous ou sous forme de particules) rejetés dans un lac tempéré par des activités aquacoles est piégée dans les sédiments, comme dans le cas des apports « naturels » en phosphore des affluents. Par conséquent, la charge totale en polluants phosphorés ne constitue pas nécessairement un indicateur précis du potentiel d'eutrophisation de la charge en phosphore. C'est la quantité de phosphore qui reste dans la colonne d'eau et qui est libérée des sédiments qui doit être prise en compte.
- Malgré leur nombre restreint, il existe toutefois des données indiquant que les formes de phosphore présentes dans les sédiments sous les cages à poisson et autour de celles-ci ont des quantités relatives différentes de celles mesurées dans les sédiments de sites de référence.
- La forme du phosphore ainsi que sa quantité doivent être comprises pour caractériser correctement le potentiel de remobilisation et, par conséquent, de développement d'une charge interne. Les charges internes en phosphore libèrent le phosphore qui était piégé dans les sédiments et le rendent biodisponible. Cette libération n'est pas souhaitable, car elle contribue au potentiel d'eutrophisation.
- D'autres échantillonnages du fractionnement du phosphore sur des sites d'aquaculture commerciale en cage et des sites de référence, ainsi que des mesures des rejets de phosphore par les sédiments (le phosphore devient par exemple soluble) permettraient de mieux caractériser le risque d'eutrophisation que pose cette accumulation de phosphore dans les sédiments.
- L'utilisation de modèles européens prenant spécifiquement en compte l'aquaculture dans la prédiction de la réaction de l'ensemble de l'écosystème lacustre aux charges en polluants phosphorés permettrait peut-être d'améliorer la gestion des effets cumulatifs de l'aquaculture en eau douce au Canada.

- Ces modèles doivent être adaptés aux écosystèmes canadiens, car la structure du réseau trophique et la chimie des sédiments peuvent différer.
- La mise en place de stratégies nutritionnelles peut être un moyen direct et efficace de gérer les rejets de phosphore provenant de la pisciculture.
- L'élaboration d'une nourriture plus efficacement utilisée par les poissons pourrait permettre de réduire l'utilisation de l'alimentation et les déchets produits.
- En Ontario, des exigences en matière d'octroi de permis imposant des quotas alimentaires et l'utilisation d'aliments à faible teneur en phosphore se sont avérées efficaces pour atténuer le potentiel d'eutrophisation attribuable aux polluants phosphorés provenant des activités de pisciculture.
- Des exigences relatives à l'installation de cages à des emplacements qui minimisent le potentiel de développement de charges internes en polluants phosphorés (p. ex. les sites où un renouvellement suffisant se produit) et des contrôles environnementaux réguliers sont actuellement utilisés pour atténuer les risques liés à la charge en polluants phosphorés.
- Des critères de sélection des sites supplémentaires, comme la mise en jachère ou l'installation dans des zones extracôtières, devraient être élaborés afin d'atténuer davantage les risques liés à la charge en polluants phosphorés émanant de l'aquaculture dans les régions côtières d'eau douce. Actuellement, l'aquaculture en cage en eau douce ne pratique pas la mise en jachère. Le déplacement des activités vers des zones extracôtières permettrait de bénéficier de charges cibles en polluants phosphorés plus élevées et d'une plus grande dispersion des déchets due à la profondeur plus importante des eaux.
- Compte tenu des niveaux de production industrielle et des pratiques actuelles, la probabilité que les apports en phosphore provenant de l'aquaculture en cage entraînent l'eutrophisation des environnements d'eau douce canadiens peut généralement être caractérisée comme étant « faible ».
- La croissance à venir de l'industrie ou le développement de toute autre activité anthropique contribuant à la charge en polluants phosphorés exige de prêter une attention particulière aux apports en phosphore, quelle qu'en soit la source.

INTRODUCTION

Au Canada, l'élevage en cage en eau douce (figure 1) est actuellement pratiqué en Ontario (lac Huron), en Saskatchewan (lac Diefenbaker) et en Colombie-Britannique (lacs Lois et Georgie). La majeure partie (57 % de la production) des activités de cette industrie sont actuellement menées en Ontario. Depuis 2000, l'industrie de l'aquaculture commerciale a connu une croissance modérée de la production de truites arc-en-ciel (*Oncorhynchus mykiss*) élevées dans des cages en eau douce. En Ontario, l'industrie de la truite arc-en-ciel est passée d'une production principalement terrestre à une production en cage à 88 % en 2010. Au Canada, la croissance de l'industrie a été très limitée et les perspectives de croissance sont incertaines en raison des défis réglementaires et environnementaux.

Les déchets sont rejetés dans les environnements aquatiques directement depuis les cages (c.-à-d. des parcs en filet) utilisées pour mener les activités aquacoles en eau douce. Ces déchets peuvent prendre la forme de matières particulaires (p. ex. fèces et aliments non consommés), qui se déposent généralement dans l'environnement benthique sous les cages en filet, ou celle de déchets dissous relâchés directement dans la colonne d'eau et émanant de la nourriture, des fèces et des excrétions métaboliques des poissons. La taille des poissons, la température de l'eau et les pratiques d'aquaculture (p. ex. la composition des aliments, le rationnement et les méthodes d'alimentation) comptent parmi les facteurs susceptibles d'influencer la quantité de déchets produits. La libération de

phosphore dans l'environnement d'eau douce revêt une importance particulière, car le phosphore est généralement l'élément le plus limitatif de la croissance des algues dans les écosystèmes d'eau douce. Des apports excessifs en phosphore dans les lacs risqueraient d'augmenter la biomasse algale, d'entraîner l'apparition de proliférations nuisibles ou nocives et de salissures algales sur la ligne de côte, et de réduire la teneur en oxygène dans les eaux profondes.

Peu de recherches ont été effectuées sur le cycle du phosphore entre les accumulations de déchets aquacoles et la colonne d'eau, et on ignore quelle proportion du phosphore résultant des activités aquacoles sera, au bout du compte, disponible pour la production primaire. Fondé sur une étude des connaissances scientifiques actuelles sur la libération du phosphore (dissous ou sous forme de particules) par les activités d'aquaculture en cage et sur des recherches menées dans la région des lacs expérimentaux et dans d'autres régions, ce processus d'examen scientifique a pour but de fournir un avis sur les impacts potentiellement associés à l'enrichissement au phosphore par l'industrie de l'aquaculture en cage en eau douce. Lors de cette réunion, on a examiné un document de recherche (Otu et al. en préparation) qui fournit des précisions techniques et la liste complète des documents cités.

ÉVALUATION

Présence du phosphore dans les environnements d'eau douce

Le phosphore est omniprésent dans l'environnement; la lithosphère de la Terre contient généralement une concentration de phosphore relativement élevée (environ 1 000 ppm en moyenne).

Le phosphore dans l'environnement est souvent présent dans les molécules de phosphate (PO_4^{-3}, PO_4^{2-}, PO_4^{-}); il se trouve rarement sous sa forme élémentaire.

Dans les lacs, le phosphore est présent à des concentrations faibles, mais variables. La productivité des plans d'eau se caractérise souvent par leur concentration totale de phosphore : oligotrophe (de 4 à 10 µg par L^{-1}), mésotrophe (de 10 à 30 µg par L^{-1}) et eutrophe (de 30 à 100 µg par L^{-1}).

Dans l'environnement aquatique, la teneur en phosphate est généralement mesurée en additionnant le phosphore total, le phosphore total dissous, le phosphore réactif soluble et les particules de phosphore. Les particules de phosphore peuvent ensuite être divisées en différentes formes chimiques grâce à des techniques de fractionnement analytiques.

Dans les systèmes biologiques, le phosphore est présent sous la forme de phosphate organique et inorganique. Le phosphate organique comprend les phospholipides, les coenzymes et les nucléotides (acide désoxyribonucléique [ADN] et acide ribonucléique [ARN]). Le phosphate inorganique comprend les ions orthophosphatés, le pyrophosphate, les polyphosphates et les minéraux phosphatés, tels que les apatites trouvées dans les arêtes ou les coquilles.

Un certain nombre de processus d'origine naturelle et anthropique contribuent à l'apport de phosphore dans les lacs (figure 2). Le phosphate dissous (PO_4) provient naturellement de l'altération chimique météorique des roches, tandis que le phosphore sous forme de particules chimiques provient de l'altération physique des roches. La décomposition des matières organiques terrestres entraîne la libération de phosphore dissous sous la forme de phosphate inorganique et de composés organiques, ou le rejet de phosphore particulaire sous la forme d'hydroxyde de fer, de carbonates et d'éléments figurés. Les sources anthropiques de phosphore comprennent les effluents d'eaux usées, les déchets d'élevage, l'épandage d'engrais, la pollution par les poussières et les effluents industriels. Les sources naturelles ou anthropiques de phosphore pénètrent dans les lacs par les rivières, directement sous la forme de précipitations, par les eaux souterraines et les écoulements, ou par le biais de dépôts atmosphériques humides ou secs; la contribution relative de chacune de ces sources varie fortement en fonction des caractéristiques du bassin hydrographique.

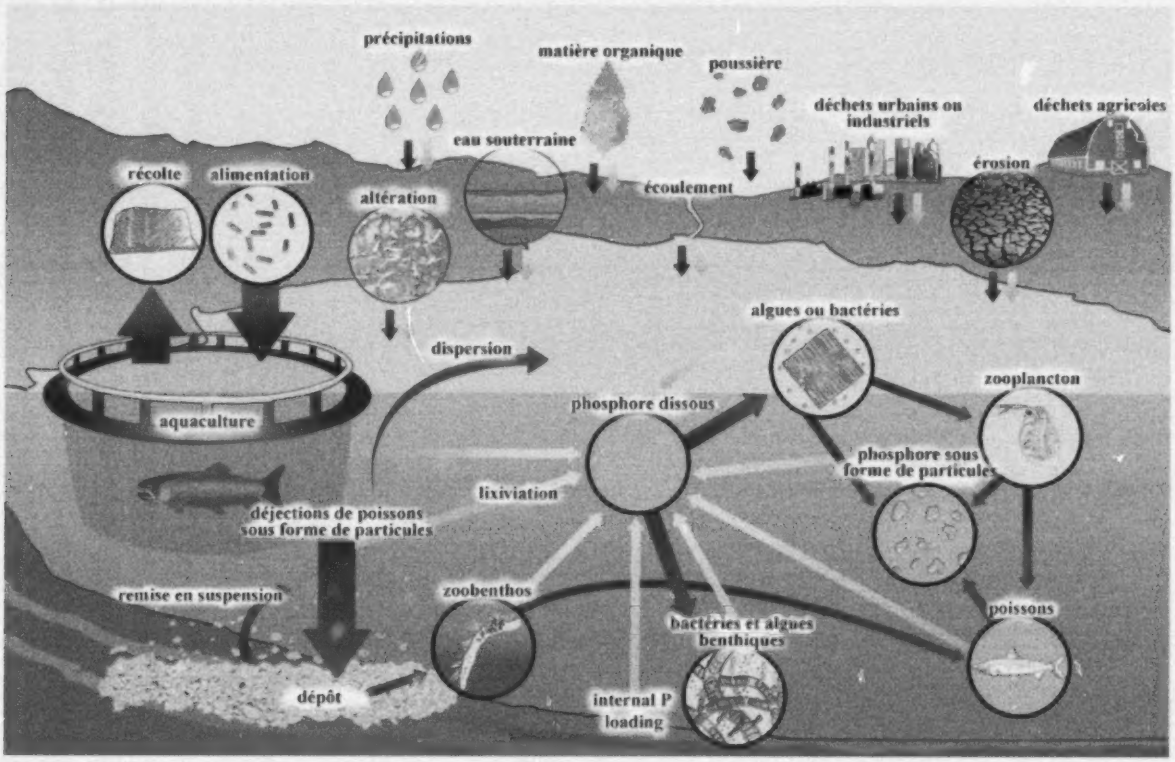

Figure 2. Diagramme des charges potentielles en polluants phosphorés dues à l'aquaculture et à d'autres sources de phosphore provenant du bassin hydrographique d'un lac (Otu et al. en préparation).

Les transformations du phosphore dans les lacs comprennent : les déplacements abiotiques physiques du phosphore, par exemple le mélange, le renouvellement et l'échange entre les sédiments et la couche limite de l'eau; des réactions chimiques comme les réactions d'oxydoréduction, les réactions acido-basiques et l'adsorption; des transformations biotiques, y compris l'absorption et le rejet par les microbes, les algues et d'autres composantes du réseau trophique.

Le phosphate prend différentes formes dans les lacs, aussi bien dans la colonne d'eau que dans les sédiments. Plusieurs processus (abiotiques et biotiques) ont une incidence sur la concentration de phosphore dans les lacs. Dans les lacs dimictiques tempérés, le phosphore obéit à un cycle saisonnier de transformations qui ordonnent les concentrations de phosphore de l'eau. Les concentrations sont généralement élevées au printemps, en raison du renversement (mélange) lacustre, et diminuent progressivement au cours de la saison des eaux libres, à mesure que le phosphore absorbé dans le réseau trophique quitte progressivement la colonne d'eau du fait de la sédimentation. Dans les lacs, la plus grande partie du phosphore est transportée vers les sédiments ou enfouie dans ceux-ci (en règle générale, plus de 80 % de la quantité totale de phosphore).

Le phosphore revêt une importance dans les environnements d'eau douce, car il limite souvent la croissance des producteurs primaires. La demande biotique élevée en phosphore dans les lacs signifie généralement que le phosphore soluble ne s'accumule pas au fil du temps dans la colonne d'eau, mais qu'il est en fait à peine détectable. La demande en phosphore est plus forte dans la zone euphotique (profondeur limite à laquelle la pénétration de la lumière de surface est de 1 %), où les producteurs primaires, comme le phytoplancton, ont accès à suffisamment d'énergie lumineuse pour accomplir efficacement leur photosynthèse. Le recyclage du phosphore dans l'épilimnion (couche supérieure d'un

lac à stratification thermique) des lacs faibles en éléments nutritifs peut se produire en quelques minutes.

La réaction de l'écosystème au phosphore est influencée par le réseau trophique. Les concentrations en phosphore de la colonne d'eau pourraient ne pas dépendre directement de la charge totale en éléments nutritifs, mais plutôt de la réaction des consommateurs de ces éléments nutritifs. Dans les lacs, l'efficacité du cycle du phosphore peut être influencée par le transfert trophique ascendant dans le réseau trophique, en raison des proportions variables de phytoplancton, de zooplancton et de poissons. Dans les Grands Lacs laurentiens, des changements importants ayant une incidence sur le réseau trophique et le cycle du phosphore ont été signalés au cours des 30 dernières années. Parmi ces changements figurent la modification de la charge en polluants phosphorés provenant de sources ponctuelles et non ponctuelles, l'introduction de moules de la famille des Dréssénidés et par conséquent, la réorganisation de la topographie du littoral, la séquestration du phosphore dans les sédiments de la zone sublittorale, et l'augmentation de la transparence de l'eau. Ce phénomène a entraîné un changement spatial du cycle du phosphore et a eu pour conséquence première la dissociation des cycles du phosphore des zones sublittorales et extracôtières. En a résulté la séquestration et l'eutrophisation du phosphore[1] dans les zones sublittorales, et son oligotrophisation dans les zones extracôtières[2].

Le lac Diefenbaker (Saskatchewan) et les lacs Lois et Georgie (Colombie-Britannique) diffèrent des Grands Lacs laurentiens par leur taille, leur profondeur, leur géologie, l'utilisation du paysage terrestre, leurs caractéristiques limnologiques, ainsi que d'autres facteurs qui pourraient avoir une incidence sur le cycle du phosphore. Il existe peu de publications sur ces écosystèmes aquatiques. Le lac Diefenbaker fera l'objet d'un numéro spécial à venir dans le Journal of Great Lakes Research. Les résultats de recherche indiquent qu'il se pourrait que les charges internes en phosphore (c.-à-d. le phosphore libéré par les sédiments et pénétrant dans la colonne d'eau) de ce vaste réservoir jouent un rôle important dans le cycle du phosphore.

L'utilisation du phosphore par les poissons et le rejet de déchets phosphorés par les activités piscicoles ont fait l'objet de nombreux efforts de recherche et sont relativement bien compris et caractérisés. Les principes de la nutrition peuvent être utilisés pour décrire ou prédire l'excrétion des déchets phosphorés par les poissons et, par extension, les activités piscicoles.

Les poissons ingèrent du phosphore sous la forme de différents éléments et nutriments dans leur alimentation. Ces éléments sont digérés, absorbés et métabolisés, puis partiellement retenus dans le corps et en partie excrétés. La quantité et la digestibilité du phosphore ingéré et les besoins en phosphore de l'animal permettront de déterminer la quantité et les types de polluants phosphorés excrétés par les poissons et, par extension, produits par les activités piscicoles.

L'animal utilise le phosphore digéré et absorbé pour soutenir ses processus vitaux et construire les composantes des tissus organiques (hydroxylapatite dans les arêtes et les écailles, phospholipides, acides nucléiques, etc.). La truite arc-en-ciel a besoin d'environ 0,6 % de phosphore digestible dans son alimentation. Les poissons qui ingèrent seulement la quantité de phosphore digestible nécessaire pour répondre à leurs besoins en matière de croissance excrètent seulement de petites quantités de phosphore dissous (~ 5 mg de phosphore par kilo de masse corporelle^{-1} par jour^{-1}).

---

[1] L'eutrophisation est la réaction de l'écosystème face à l'apport d'éléments nutritifs en quantité excessive (principalement des phosphates) provenant de détergents, de fertilisants ou des eaux usées dans un lac ou un plan d'eau, entraînant ainsi une croissance dense de la vie végétale. La décomposition des plantes réduit l'apport en oxygène.

[2] L'oligotrophisation est la diminution des éléments nutritifs dans un lac ou une autre masse d'eau, ce qui réduit la capacité du lac à favoriser la croissance des plantes et des microorganismes aérobies et à contenir de l'oxygène dissous en abondance à toutes les profondeurs.

La quantité de déchets phosphorés sous forme de particules produite par les activités aquacoles dépend principalement de la quantité (concentration) et de la digestibilité des différentes formes de phosphore présentes dans le régime alimentaire de l'animal. Les éléments non digérés contenant du phosphore sont expulsés sous forme de matières fécales par l'animal, et le phosphore sous forme de particules contenu dans les excréments se dépose dans les sédiments. La quantité digestible de phosphore qui va au-delà des besoins des poissons est excrétée dans l'urine sous la forme d'orthophosphates et représente la plus grande partie des rejets de phosphore dissous provenant des activités piscicoles. Le phosphore dissous pénètre dans la colonne d'eau.

La quantité et le type de déchets phosphorés produits par les activités piscicoles peuvent être estimés en s'appuyant sur la quantité de nourriture utilisée, la concentration totale de phosphore dans la nourriture, la digestibilité du phosphore dans la nourriture, la concentration en phosphore dans l'ensemble du corps du poisson, l'indice de consommation, ainsi que le gaspillage des aliments des activités piscicoles. La quantité et le type des déchets phosphorés produits par les activités piscicoles peuvent être relativement variables selon le type d'activité piscicole, les saisons, les années, la taille du poisson et les cycles de production.

La concentration de phosphore dans les tissus musculaires du poisson est stable et évolue légèrement lorsque la taille de la truite arc-en-ciel change. L'évolution de la concentration de phosphore dans le corps est correctement décrite par les modèles mathématiques. Les concentrations totales en phosphore dans le corps entier de la truite arc-en-ciel varient entre 0,3 et 0,45 %. La concentration de phosphore dans la nourriture pour truite arc-en-ciel d'élevage utilisée au Canada varie généralement entre 0,9 et 1,4 %. La digestibilité du phosphore présent dans la nourriture pour truite arc-en-ciel d'élevage utilisée au Canada varie généralement entre 40 et 60 %.

L'indice de consommation, c'est-à-dire le poids des aliments secs comparé au poids humide de l'animal produit, est une mesure utilisée en élevage pour mesurer l'efficacité avec laquelle un animal transforme les aliments en croît d'un produit donné (p. ex. la biomasse de poisson). Les indices de consommation correspondant aux activités commerciales de pisciculture au Canada dépendent en grande partie du poids des poissons, de la qualité des aliments utilisés (leur composition nutritionnelle principalement), ainsi que des facteurs environnementaux (température, saison) et des pratiques d'élevage (pratiques d'alimentation, gestion de la production, etc.). Les indices de consommation correspondant à l'élevage commercial de la truite arc-en-ciel en Ontario varient entre 1,15 et 1,35 tout au long du cycle de production (d'un poids d'empoissonnement de 30 g généralement à un poids de récolte de 1,1 kg généralement).

Dans les installations piscicoles modernes, l'alimentation est généralement bien gérée et le gaspillage alimentaire est très limité (moins d'un pour cent des aliments utilisés). Par conséquent, la majeure partie (plus de 97 %) des déchets particulaires de phosphore rejetés par les activités piscicoles est d'origine fécale.

On estime que la quantité totale « générale » des déchets phosphorés produits par les activités d'élevage de la truite arc-en-ciel au Canada contient entre 7 et 15 kg de phosphore (de 3 à 9 kg de phosphore sous forme de particules et de 4 à 6 kg de phosphore dissous) par tonne de biomasse de poisson produit pour la truite arc-en-ciel dont le poids de récolte est compris entre 30 et 1 100 g dans des conditions commerciales.

Il est possible d'obtenir une estimation précise de la quantité et du type de déchets phosphorés produits par les activités d'élevage en cage grâce à l'analyse des données de production et d'alimentation (quantités et mesure directe de la digestibilité ou estimation à partir des données détaillées de formulation) utilisées dans les activités piscicoles. Parmi les méthodes d'estimation de la quantité d'apports en phosphore figurent l'approche par bilan massique simple, différents modèles nutritionnels (p. ex. le modèle informatique Fish-PrFEQ) et les mesures directes (p. ex. l'échantillonnage sous les cages à l'aide de pièges à sédiments). En raison de la dispersion et de l'absorption rapides du phosphore dans l'environnement, l'échantillonnage du milieu récepteur n'est pas

une méthode fiable d'estimation de la production de déchets. Les modèles nutritionnels et les méthodes de bilan massique sont les méthodes les plus pratiques. Il a été démontré que le modèle nutritionnel produisait des estimations très précises des déchets produits par l'aquaculture en cage.

Hua et al. (2008) ont intégré des données sur la nutrition en phosphore des poissons dans un modèle factoriel qui peut être utilisé pour estimer le taux de digestibilité du phosphore, sa rétention et la production de déchets des activités d'élevage de salmonidés. Ce modèle s'inscrit dans le cadre du modèle bioénergétique Fish-PrFEQ (Cho et Bureau 1998, Bureau et al. 2003) et génère des estimations précises des déchets produits par les activités d'élevage de la truite arc-en-ciel, afin de permettre l'estimation théorique des différents types de déchets phosphorés.

Cycle et devenir des formes chimiques du phosphore

Entre 2002 et 2009, une expérience d'aquaculture a été menée dans le lac 375 de la région des lacs expérimentaux. L'expérience L375 est une étude scientifique très détaillée portant sur les impacts écosystémiques de l'aquaculture et fournit le modèle de bilan massique d'un site d'aquaculture d'eau douce le plus précis dont on dispose actuellement. Ce bilan massique a montré que la sédimentation était le devenir principal du phosphore (de 84 à 93 % des apports) (figure 3). Par conséquent, la majeure partie des apports en phosphore provenant de l'aquaculture a été transportée vers les sédiments et n'est pas immédiatement accessible aux processus biologiques.

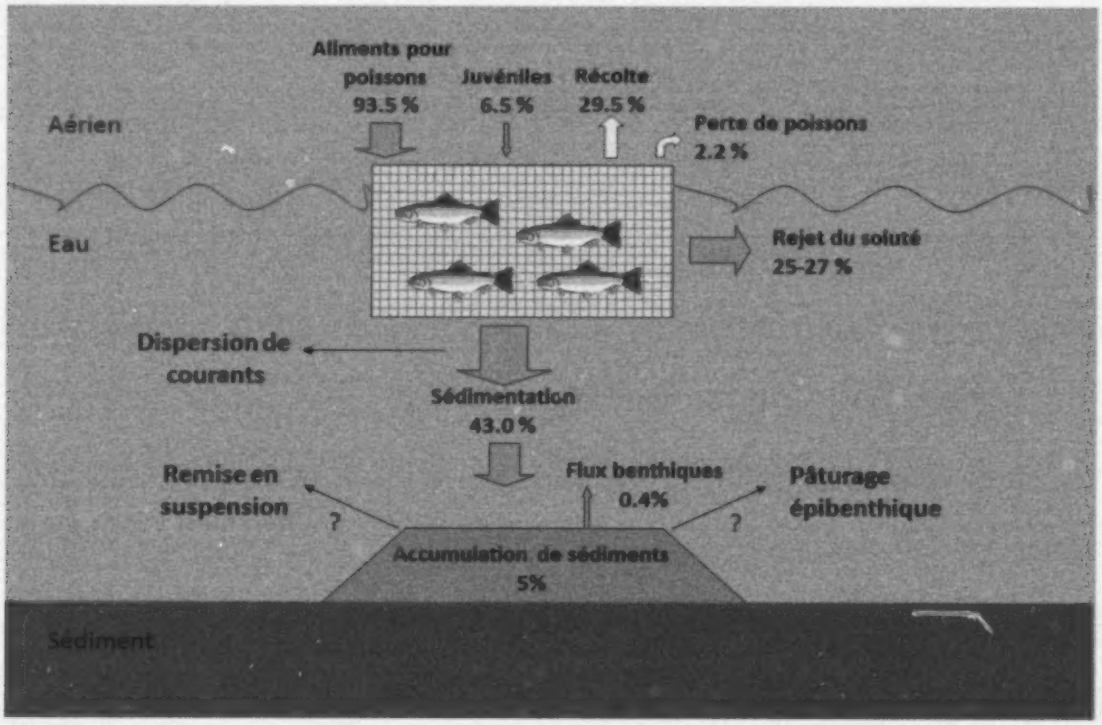

Figure 3. Bilan massique du phosphore dans le lac 375, production aquacole expérimentale dans la région des lacs expérimentaux en 2005.

Même si l'expérience s'appuyait autant que possible sur des méthodes commerciales, elle ne simulait pas les taux de charge de l'aquaculture commerciale dans ce petit lac; une comparaison entre le volume d'eau, la biomasse de poisson produit et le temps de résidence du plan d'eau laisse entendre que la charge en phosphore de l'expérience était supérieure d'environ deux ordres de grandeur à la charge d'un contexte commercial. Par conséquent, les impacts observés constitueraient la pire

hypothèse. La charge de phosphore produite par la ferme aquacole expérimentale (entre 0,27 et 0,41 g de phosphore par m^{-2}) du lac 375 a été conçue pour être comparable à celle des études de fertilisation précédemment menées dans la région des lacs expérimentaux (0,34 et entre 0,34 et 0,48 g de phosphore par m^{-2} pour les lacs 226 et 227, respectivement). Cela permettait aux chercheurs de comparer la réaction de l'écosystème aux déchets phosphorés émanant de l'aquaculture (particules sédimentables principalement) à la réaction de l'écosystème au phosphore dissous rejeté dans l'épilimnion d'un lac. Bien que les apports en phosphore dus à l'aquaculture aient entraîné des changements mesurables de la qualité de l'eau et une augmentation de la production d'algues, l'ampleur de ces changements était considérablement plus faible que celle observée dans les lacs 226 et 227. Par ailleurs, le lac 375 restait oligotrophe, contrairement aux lacs 226 et 227.

La Commission mixte internationale (CMI) établit des charges cibles en polluants phosphorés pour les Grands Lacs afin de gérer la charge en polluants phosphorés et de maintenir ainsi des conditions oligotrophes, et afin de réduire la probabilité de développement d'algues nuisibles. Dans le chenal du Nord du lac Huron, où la plupart des activités commerciales d'aquaculture en cage en eau douce au Canada ont lieu, la charge cible totale en polluants phosphorés est de 520 tonnes métriques par an. Dolan et Chapra (2012) ont calculé les charges en polluants phosphorés de la période allant de 1994 à 2008 et ont signalé que les charges du chenal du Nord ont dépassé les niveaux cibles quatre fois au cours de la période étudiée. Généralement, la charge en polluants phosphorés dépassait la charge cible établie pendant les années humides. La charge la plus élevée était majoritairement attribuable à des sources diffuses (bassin versant). Cependant, Dolan et Chapra (2012) ont pris en compte tous les débits de la rivière St. Mary et du complexe de rivières Les Cheneaux dans leur analyse et s'interrogent sur la véracité de cette affirmation. On estime qu'environ 30 % du débit de la rivière St. Mary alimente le chenal du Nord (David Schwab, NOAA, comm. pers.), tandis que Zhao et al. (2012) estiment que l'interaction entre Les Cheneaux et le chenal du Nord est de 0,7 % seulement. Le relatif manque de données pour attribuer avec précision le débit et la charge en polluants phosphorés à ces deux sources, ainsi que la surveillance limitée des autres sources approvisionnant le chenal du Nord en phosphore constituent des zones d'incertitude quant au bilan en phosphore du chenal du Nord.

Si l'on s'appuie sur les données de production et les chiffres relatifs à la charge en polluants phosphorés des bassins versants de 2006, l'aquaculture apporte une concentration totale en phosphore d'environ 14,1 tonnes métriques par an (5,1 tonnes métriques annuelles de phosphore dissous) au chenal du Nord (tableau 1), ce qui représente environ 5 % de la charge totale annuelle en phosphore. Cela représente environ un tiers du volume qui pénètre dans le chenal du Nord par le biais de précipitations chaque année.

La charge en phosphore dissous est plus préoccupante dans les zones littorales des Grands Lacs, où la séquestration sur le littoral et le renversement rapide du phosphore peuvent créer des conditions de salissures algales et d'eutrophisation. Les travaux de Dolan et Chapra (2012) ont clairement mis en lumière que les précipitations jouaient un rôle dans la variation interannuelle des charges en polluants phosphorés et que de ce fait, il fallait s'attendre à ce que l'influence de l'aquaculture en cage sur les conditions sublittorales soit plus importante les années où les apports en eau et la charge des bassins versants sont moindres, comme c'était le cas en 2006.

Les plans de réduction du phosphore mis en place en réponse à l'établissement de charges cibles par la Commission mixte internationale étaient axés sur la réduction de la charge en polluants phosphorés provenant de sources ponctuelles, grâce à la mise en place de mécanismes d'épuration des eaux usées et de limites d'émission d'effluents, tandis que la réduction du phosphore provenant de sources non ponctuelles était axée sur l'érosion du sol, et par conséquent, sur la réduction des charges en polluants phosphorés sous forme de particules. La surveillance à long terme de la charge en polluants phosphorés du lac Érié par le National Centre for Water Quality Research de l'université Heidelberg (Ohio) a permis de déterminer que depuis les années 1990, une augmentation importante des charges en polluants phosphorés des affluents sous forme de phosphore soluble réactif hautement

biodisponible s'est produite (Joosse et Baker 2011, LaBeau et al. 2014). Il semblerait qu'elle ait été causée principalement par l'évolution des pratiques agricoles.

Tableau 1. Charges totales en polluants phosphorés dans le chenal du Nord en 2006 (données de Dolan et Chapra, 2012), y compris une estimation de la charge totale en polluants phosphorés des activités aquacoles d'élevage en cage de la truite arc-en-ciel. En raison de l'incertitude liée à la détermination des débits provenant du complexe Les Cheneaux et de la rivière St. Mary qui alimentent le chenal du Nord, les charges en polluants phosphorés résultant de l'apport le plus faible et le plus élevé en eau sont fournies. La charge de déchets provenant de l'aquaculture a été estimée en s'appuyant sur la plage de phosphore dissous et sous forme de particules produit par tonne de production dans les fermes canadiennes. Remarque : La charge cible totale en phosphore actuellement établie par la CMI pour le chenal du Nord est de 520 tonnes métriques par an.

Charges totales en polluants phosphorés dans le chenal du Nord, 2006	**Charge totale en phosphore apport faible (apport élevé) (tonnes métriques)**	**Charge totale en phosphore/ Total apport faible (apport élevé) (%)**	**Charge totale en phosphore dissous (tonnes métriques)**	**Charge totale en phosphore dissous/Total faible (élevé) (%)**
Production de l'aquaculture (1 660 tonnes)[1]	11,70 (24,98)	4,4 (7,6)	6,72 (10,04)	57,4 (40,2)
Sources industrielles ponctuelles (rivière St. Mary's)[2]	8,7 (29)	3,2 (8,8)	6,2 (21)	71,3 (72,4)
Sources municipales ponctuelles (usine de traitement des eaux usées de Sault Ste. Marie)	5,1	1,9 (1,5)	3,6	70,6
Rejets directs dans le chenal du Nord	1	0,37 (0,30)	1	100
Sources indirectes non surveillées	16	6,0 (4,8)	3	18,8
Dépôts atmosphériques humides	48	17,9 (14,5)	33	68,8
Dépôts atmosphériques secs	48	17,9 (14,5)	0	-
Lac Wolsey [3]	0,18	0,07 (0,05)	0,18	100
Rivière Spanish [4]	98	36,6 (29,7)	32	32,7
Rivière Mississagi	20	7,5 (6,1)	2	10,0
Complexe du delta Les Cheneaux	0,9 (30)	0,3 (9,1)	0,2 (7)	22,2 (23,3)
Rivière Serpent	2	0,7 (0,6)	0,4	20,0
Rivière Blind	2	0,7 (0,6)	0,3	15,0
Rivière Garden	2	0,7 (0,6)	0,3	15,0
Rivière Thessalon	2	0,7 (0,6)	0,2	10,0
Rivière Root	2	0,7 (0,6)	0,1	5,0
Rivière Big Carp	0,1	0,04 (0,3)	0,01	10,0
Ruisseau Davignon Est	0,04	0 (0,01)	0,005	12,5
TOTAL	**267,72 (330,38)**	**100**	**87,7 (109,3)**	**33,2 (34,5)**

[1] En 2006, la production aquacole de toutes les activités d'aquaculture en cage du lac Huron, sauf une ferme dans la baie Georgienne et une ferme dans le lac Wolsey (données fournies par Moccia et Bevan, Aquaculture Centre, Université de Guelph), totalisait 1 660 tonnes de poisson.

[2] La rivière St. Mary alimente à la fois le bassin principal du lac Huron et le chenal du Nord, et seules 30 % des sources industrielles ponctuelles (29 tonnes métriques par an) peuvent contribuer au bilan du chenal du Nord (Bai et al. 2013).

[3] Le lac Wolsey possède un chenal artificiel qui le relie au chenal du Nord et permet un échange direct d'eau. Il a été calculé que la charge totale en phosphore apportée par le lac Wolsey dans le lac Huron est de 262 kg par an. Elle est attribuable dans son intégralité à la charge totale en phosphore dissous, et on suppose qu'une partie (32 % ou 83,84 kg par an) de cette charge est issue des activités du lac Wolsey (Milne 2012).

[4] La charge de la rivière Spanish se caractérisait par une concentration totale de phosphore de 40 tonnes métriques par an (concentration totale de phosphore dissous de 28 tonnes métriques par an) provenant de sources ponctuelles et d'une concentration totale de phosphore de 58 tonnes métriques par an (concentration totale de phosphore dissous de 4 tonnes métriques par an) provenant de sources non ponctuelles.

[5] Le complexe du delta Les Cheneaux consiste en une série de débits entrants qui pénètrent dans le lac Huron principal. Selon les estimations, seuls 3 % de la charge de Les Cheneaux (concentration totale de phosphore de 29 tonnes métriques par an ou concentration totale de phosphore dissous de 7 tonnes métriques par an) alimentent le chenal du Nord (Zhao et al. 2012). Les estimations relatives aux charges élevées se réfèrent à l'intégralité de la charge totale en phosphore et de la charge totale en phosphore dissous mesurées, sans fractionnement du débit d'eau.

[6] Le calcul des charges totales en phosphore dissous était fondé sur la valeur des mesures des sources ponctuelles industrielles et municipales et sur les mesures prises par Milne (2012) dans les rivières surveillées (rivières Mississagi, Root et Spanish), tandis que toutes les autres ont été estimées en s'appuyant sur les bassins hydrographiques avoisinants.

En 2011, le lac Érié a connu une prolifération d'algues sans précédent (Michalak et al. 2013). Cependant, les habitudes d'utilisation des terres dans la zone du chenal du Nord ne sont pas très tournées vers l'agriculture. Par conséquent, une augmentation similaire du rapport entre concentration de phosphore dissous et concentration totale de phosphore pourrait ne pas se produire; toutefois, le niveau de surveillance des affluents dans la zone du chenal du Nord n'est pas suffisant pour tirer des conclusions.

Les déchets phosphorés sous forme de phosphore dissous provenant de l'aquaculture (soit, en général, environ 30 % des rejets totaux de phosphore produits par ces activités) sont facilement accessibles pour l'absorption biotique par les bactéries et les producteurs primaires. Dans le milieu récepteur, le phosphore dissous est à nouveau dilué dans la colonne d'eau et est assimilé rapidement dans la chaîne alimentaire. Ces processus se produisent tellement rapidement que les programmes de surveillance du lac Huron ne détectent habituellement pas les concentrations totales élevées de phosphore dans la colonne d'eau en aval des fermes (Podemski et Kshymensky, en préparation). Le pourcentage de phosphore ajouté qui est assimilé par les algues nuisibles dépend en grande partie de la forme du phosphore ajouté, de la disponibilité d'autres éléments nutritifs essentiels, de l'endroit où le phosphore est rejeté et des caractéristiques du réseau trophique et du plan d'eau, de la disponibilité d'autres éléments nutritifs essentiels et de la quantité de phosphore ajoutée.

Les déchets phosphorés sous forme de particules, qui se trouvent principalement à l'état de fèces, se déposent rapidement sur les sédiments. La profondeur de l'eau influe sur la distribution et la transformation des déchets sous forme de particules (consommés par les poissons sauvages ou lessivés) à mesure qu'ils se déposent. Dans les conditions hydrodynamiques des sites canadiens étudiés, ces déchets ne se répandent pas largement, mais s'accumulent directement sous les cages, ce qui restreint la zone touchée.

La sédimentation du phosphore assimilé dans le biote (p. ex. les algues), ainsi que la sédimentation des déchets phosphorés sous forme de particules est le devenir principal du phosphore que l'aquaculture apporte dans l'écosystème lacustre. Cette situation est semblable au devenir du phosphore provenant des affluents : ce phosphore est principalement transporté vers les sédiments, puis piégé dans ceux-ci.

La remobilisation du phosphore piégé dans les sédiments peut être provoquée par la remise en suspension de matières déposées ou par le rejet chimique du phosphore par les sédiments. Le premier phénomène est le résultat de la circulation de l'eau à une vitesse dépassant le seuil de remise en suspension, tandis que le deuxième est un processus chimique dépendant de la forme du phosphore et des conditions environnementales au niveau et au-dessus des sédiments.

Le phosphore libéré par les déchets qui s'établissent au fond du lac peut accroître le risque d'eutrophisation du plan d'eau. Par conséquent, il est nécessaire de comprendre les facteurs qui ont

une incidence sur la quantité et le moment de la libération du phosphore. Les particules de phosphore prennent différentes formes chimiques, et les conditions environnementales nécessaires pour la transformation du phosphore sous forme de particules en phosphore dissous, puis pour sa libération des sédiments, varient. Le fractionnement du phosphore, qui utilise des techniques d'extraction pour fractionner le volume total de phosphore en phosphore soluble, en phosphore lié au fer (Fe), à l'aluminium (Al) ou au calcium (Ca), en phosphore organique et en phosphore résiduel, participe à la compréhension de la chimie des sédiments (p. ex. la disponibilité du Fe et du SO4) et peut aider à comprendre le potentiel de mobilisation de la charge en phosphore libérée par les sédiments dans l'eau. Par exemple, si le rapport entre le fer et le phosphore est faible ou que de grandes zones du fond du lac deviennent anoxiques, le phosphore soluble et le phosphore lié au fer peuvent devenir solubles rapidement. Les autres formes ne sont pas disponibles si facilement. Le phosphore lié au calcium (hydroxyapatite de calcium, provenant des arêtes dans les aliments pour poissons) requiert un environnement acide pour se dissoudre (Andrieux et Aminot 1997). Les bioessais démontrent que cette forme de phosphore ne stimule pas la croissance algale (Williams et al. 1980) et plusieurs auteurs considèrent que l'apatite a une faible biodisponibilité (p. ex. Sonzogni et al. 1982, Li et Brett 2013). Le fractionnement du phosphore sous forme de particules dans les sédiments se trouvant sous les cages des activités d'aquaculture diffère de celui des sites de référence du lac Huron (tableau 2). Par exemple, le phosphore rapidement mobilisé (phosphore soluble et lié au fer) représente 13 % du phosphore total sous les cages, contre 4,1 % sur les sites de référence, tandis que les volumes les moins solubles de phosphore lié au calcium sous les cages représentent 65 % du phosphore total sous les cages, contre 32 % sur les sites de référence. Le volume de phosphore total susceptible de se dissoudre rapidement est plus élevé sous les cages que sur les sites de référence, mais la superficie concernée est généralement limitée à moins de 30 m autour des cages, ce qui pourrait permettre d'atténuer les risques de charge interne en phosphore. Il est possible que les analyses de fractionnement du phosphore à venir permettent de mieux prédire le potentiel de production de charge interne en phosphore entraîné par les retombées dans les sédiments de déchets produits par l'aquaculture.

Tableau 2. Pourcentage et écart-type des concentrations totales en phosphore mesurés par les analyses de fractionnement du phosphore provenant des sédiments de surface de trois sites : sous les cages à poisson, 30 m autour de ces cages et sur des sites de référence (à plus de 1 000 m) abritant deux fermes d'élevage commercial en eau douce de la truite arc-en-ciel dans le lac Huron (Podemski, données non publiées).

Fractionnement	Sous les cages	30 m from cages	Site de référence	Mobilité
Phosphore soluble (NH_4Cl-P)	7,8 ± 1,4	1,5 ± 0,8	0,9 ± 0,9	Labile (anoxie)
Phosphore lié au fer (BD-P)	5,1 ± 0,1	4,6 ± 1,3	3,2 ± 2,0	Labile (anoxie)
Phosphore organique (NaOH-nrP)	2,0 ± 0,6	5,2 ± 3,8	16,8 ± 3,1	En partie labile (anoxie)
Phosphore lié à l'aluminium (NaOH-rP)	5,5 ± 0,7	12,6 ± 8,3	9,2 ± 5,3	
Phosphore lié au calcium (HCl-P)	65,0 ± 3,9	50,2 ± 23,5	32,4 ± 13,9	Réfractaire
Phosphore résiduel	7,0 ± 0,1	8,1 ± 1,1	11,6 ± 1,7	Réfractaire

Méthodes de prévision, de gestion et d'atténuation des effets du phosphore provenant de l'aquaculture en cage

La réaction lacustre à un apport en phosphore peut être prévue par des modèles allant des modèles empiriques simples, qui associent la charge en phosphore à des concentrations en chlorophylle a, à

des modèles dynamiques simples qui considèrent le lac comme une entité unique, en passant par des modèles dynamiques complexes qui séparent le lac en plusieurs unités et prennent en compte un grand nombre de processus hydrodynamiques et écologiques.

Actuellement en Ontario, le modèle de simulation de la capacité des rivages (Lakeshore Capacity model), un modèle empirique fondé sur les travaux de Vollenweider et établissant un lien entre la variation de la charge en phosphore des activités des bassins versants et les variations des concentrations en chlorophylle a, est l'approche la plus souvent utilisée pour prendre des décisions concernant la capacité des petits lacs à assimiler les apports en phosphore provenant de l'aménagement du rivage des lacs. Il n'est habituellement pas appliqué à la réglementation des activités aquacoles (Milne 2012).

La charge en phosphore provenant des installations aquacoles expérimentales du lac 375 améliorait la productivité du phytoplancton et de la biomasse, mais dans une moindre mesure que ce qui avait été prévu par les modèles fondés sur les travaux de Vollenweider (Bristow et al. 2008). Une surestimation semblable de la réaction à la charge en phosphore provenant de l'aquaculture faite par la modélisation de Vollenweider a été observée par Håkanson et Carlsson (1998). Les modèles LEEDS (Håkanson et Carlsson 1998) et LakeWeb (Håkanson 2005) sont deux modèles plus sophistiqués mis à l'essai en Europe et qui visent à prévoir la réaction de l'ensemble de l'environnement lacustre aux charges en polluants phosphorés. Ils ont fourni des prévisions plus précises de la réaction de la chlorophylle à la charge en polluants phosphorés. Ces deux modèles liés (LEEDS est une version modifiée de LakeWeb) prennent en compte le phosphore à l'état dissous et sous forme de particules, et intègrent les processus de consommation directe de déchets phosphorés par les poissons sauvages, de sédimentation, de minéralisation, de remise en suspension et d'advection, de diffusion, d'enfouissement, d'absorption biotique, de libération du phosphore par le biote et de mélange entre les strates. Aucune version n'a été mise à l'essai pour déterminer leur applicabilité aux écosystèmes canadiens.

Étant donné que les déchets phosphorés (phosphore dissous et sous forme de particules) produits par les poissons proviennent de l'absorption, de la digestion et du métabolisme des éléments phosphorés alimentaires, les stratégies nutritionnelles offrent un moyen direct de gérer et d'atténuer le rejet des déchets phosphorés provenant de la pisciculture. La modification de la composition des aliments a démontré qu'elle permettait de minimiser efficacement les déchets phosphorés produits par les activités piscicoles (Cho et al. 1994, Cho et Bureau 1997, Hua et al. 2008). Des manipulations alimentaires ont été utilisées pour améliorer la digestibilité du phosphore alimentaire. La formulation de régimes alimentaires qui ont réduit les concentrations totales de phosphore et répondent de manière appropriée aux besoins nutritionnels du poisson a permis de réduire le volume de déchets phosphorés produits par les activités de pisciculture. En Ontario, les exigences en matière de permis d'aquaculture ont établi un seuil limite de phosphore dans les aliments. Toutefois, la *Loi relative aux aliments du bétail* du Canada impose un seuil minimal de 1 % de phosphore dans les aliments, ce qui risque de rendre les diminutions supplémentaires impossibles. Les quotas alimentaires annuels (quantité de nourriture annuelle qu'une ferme peut utiliser) ont permis de réduire efficacement les déchets phosphorés émanant des activités piscicoles. Parmi les mesures supplémentaires à envisager figurent l'amélioration de la composition des aliments, de manière à renforcer l'efficacité de l'utilisation des aliments et à réduire ainsi la quantité de nourriture nécessaire pour limiter les rejets solides ou sous forme de particules.

La sélection appropriée de l'emplacement des activités aquacoles est une stratégie efficace pour atténuer les effets de la charge en polluants phosphorés. En Ontario, le processus de délivrance de permis restreint l'installation aux zones où le renouvellement hypolimnique est suffisant, afin de limiter la probabilité d'anoxie et, par conséquent, les charges internes en phosphore.

Les critères de sélection des sites pourraient être affinés davantage de manière à atténuer les risques liés à la charge en polluants phosphorés. Les concentrations de phosphore dans les Grands Lacs ne

sont pas réparties de manière homogène; la charge en phosphore sublittorale fait l'objet d'une plus grande préoccupation en raison de son potentiel à entraîner l'apparition de salissures algales sur la ligne de côte. En revanche, la charge en phosphore des eaux extracôtières est moins préoccupante, car elle est limitée. Le déplacement des cages au large est une stratégie d'atténuation qui pourrait être envisagée pour réduire la charge en polluants phosphorés des zones sublittorales.

Bien qu'aucune donnée scientifique concernant les zones d'eau douce ne soit disponible actuellement et que les données relatives aux milieux marins soient limitées, les stratégies de mise en jachère pourraient également constituer une mesure d'atténuation efficace pour lutter contre le dépassement du seuil limite de phosphore des sites aquacoles sublittoraux.

La surveillance environnementale continue des sites aquacoles d'eau douce au Canada permet de veiller à ce que les répercussions sur l'environnement soient signalées. En Ontario et en Saskatchewan, les conditions de permis exigent la surveillance continue de la chimie de l'eau (concentrations totales de phosphore, concentrations d'O_2 dissous) et de la chimie des sédiments. En Ontario, les effets négatifs donnent lieu à une exigence d'échantillonnage supplémentaire et même, dans certains cas, à l'obligation d'adopter des stratégies d'atténuation, comme la diminution des quotas alimentaires.

Caractérisation des risques liés au phosphore provenant de l'aquaculture en cage en eau douce

Cet examen ne fournit pas une évaluation officielle du risque, mais caractérise plutôt certains des risques liés aux apports en phosphore provenant de l'aquaculture en eau douce.

Compte tenu des niveaux de production industrielle et des pratiques actuelles, la probabilité que les apports en phosphore provenant de l'aquaculture en cage entraînent l'eutrophisation des environnements d'eau douce canadiens peut généralement être caractérisée comme étant « faible ». En Ontario, la réglementation permet la régularisation de l'industrie, et les ententes de surveillance offrent aux organismes provinciaux le moyen de repérer les cas de non-conformité. Les mesures d'atténuation actuelles comprennent la surveillance de la qualité de l'eau et des sédiments, l'imposition d'une teneur maximale en phosphore dans les aliments, l'utilisation de quotas alimentaires et l'imposition de critères de sélection des sites. À l'heure actuelle, l'industrie de l'aquaculture représente environ 5 % des apports totaux en phosphore dans le chenal du Nord, et la surveillance environnementale régulière n'a pas été en mesure de déceler de situation importante de non-respect des normes de qualité de l'eau.

À la fin des années 1990, la zone située autour d'un site aquacole d'eau douce du chenal LaCloche, près de l'île Manitoulin, a connu des problèmes de faibles taux d'oxygène dissous et de proliférations algales (Gale 1999). Il a été conclu que l'emplacement du site était inadéquat, car les taux de renouvellement de l'eau dans la zone étaient bas. Le site a été désaffecté en 1998. Depuis lors, les fermes du lac Huron ont été installées dans des zones jouissant d'un meilleur renouvellement hypolimnique, et aucun problème lié aux algues excessives ou au faible taux d'oxygène dissous n'a été signalé. Les concentrations totales de phosphore des sites d'aquaculture jouissant d'un permis sont surveillées régulièrement en Ontario et ne dépassent pas les seuils établis par les lignes directrices provinciales sur la qualité de l'eau.

Il est possible de connaître avec certitude les apports en phosphore provenant des sites disposant de permis grâce à l'utilisation de la modélisation nutritionnelle. Toutefois, un certain degré d'incertitude demeure quant à la charge en polluants phosphorés émanant des activités aquacoles des fermes qui ne communiquent pas de données sur leur production, leur utilisation alimentaire et leurs activités de surveillance aux autorités provinciales ou fédérales.

Bien que l'industrie de l'aquaculture en cage en eau douce dans le lac Huron soit actuellement durable, comme en témoignent sa faible contribution à la charge totale en polluants phosphorés et l'absence de

concentrations élevées de phosphore dans les eaux réceptrices en aval des activités, la croissance de l'industrie (ou le développement de toute activité contribuant à la charge en phosphore) exige la prise en compte de la quantité totale de phosphore (provenant de toutes les sources et pas uniquement de l'aquaculture) et de l'emplacement, afin de ne pas dépasser les charges totales limites dans le secteur. Le niveau d'incertitude quant à l'importance de la charge en polluants phosphorés apportée dans les lacs par les bassins versants est élevé, en raison du manque de surveillance suffisante de toutes les sources d'apport. Par ailleurs, on connaît mal la variation interannuelle de la charge en phosphore. Compte tenu de l'incertitude entourant d'autres sources de phosphore, on estime que les apports en phosphore correctement quantifiés provenant de l'aquaculture aux niveaux actuels de production et l'utilisation des pratiques actuelles de l'industrie apportent peu de preuves d'une contribution à l'eutrophisation des eaux réceptrices.

De plus, des facteurs de confusion, tels que l'introduction d'espèces envahissantes, l'évolution des pratiques d'utilisation des terres et les changements climatiques, remettent en question notre compréhension actuelle de l'influence du phosphore émanant des activités d'élevage en cage en eau douce sur l'eutrophisation.

Dans les conditions environnementales actuelles, les préoccupations relatives aux concentrations de phosphore dans les Grands Lacs ont trait à la répartition spatiale des charges en polluants phosphorés. Dans les zones sublittorales, il est impératif d'atténuer les charges en polluants phosphorés, en raison de la présence de salissures algales sur la ligne de côte, tandis que dans les eaux extracôtières, la charge en polluants phosphorés est moins préoccupante. Des charges en phosphore plus élevées peuvent être envisagées comme un moyen de répondre aux préoccupations liées à la faible productivité des poissons fourrages et aux piètres conditions des espèces de poissons de sport et commerciales. La CMI revoit actuellement ses charges cibles en phosphore (actuellement à 520 tonnes métriques par an dans le chenal du Nord); il est prévu qu'elle fasse pour la première fois la distinction entre les zones sublittorales et extracôtières, et qu'elle établisse également des cibles différentes pour le phosphore dissous et le phosphore sous forme de particules. On s'attend à ce que la redistribution des charges cibles de phosphore entraîne notamment l'établissement de cibles plus basses de phosphore dissous dans certaines zones sublittorales, tandis qu'il est probable que des charges cibles plus élevées soient fixées dans les eaux extracôtières.

Sources d'incertitude

Incertitude entourant les données

Bien que la connaissance de la teneur en phosphore dans les aliments et que l'utilisation de quotas alimentaires puissent être utilisées de concert pour estimer la charge en polluants phosphorés, la concentration de phosphore dérivée des activités aquacoles des fermes qui ne communiquent aucune donnée aux autorités provinciales ou fédérales n'est pas connue avec certitude en Ontario.

L'acquisition de connaissances plus approfondies des principaux facteurs biologiques, limnologiques et géochimiques susceptibles d'influencer le cycle du phosphore en fonction de chaque écosystème est nécessaire. Il est notamment impératif de mieux comprendre les processus physiques (p. ex. le climat, la profondeur, la température), chimiques (p. ex. redox, fer, sulfate) et biologiques (p. ex. interactions des invertébrés et décomposition) agissant sur le dépôt des déchets aquacoles sous les cages d'élevage en eau douce, afin de mieux comprendre la remobilisation du phosphore provenant des déchets.

Les facteurs biologiques, limnologiques et géochimiques principaux qui influent sur le cycle du phosphore et la façon dont ils varient en fonction des différents écosystèmes lacustres canadiens accueillant des activités de production aquacoles ou candidats à de telles activités ne sont pas bien compris.

La mesure de toutes les sources de phosphore externes (notamment les sources non ponctuelles de phosphore) doit être améliorée pour mieux saisir la variabilité de la charge en polluants phosphorés. Les mesures devraient refléter le fractionnement du phosphore dissous et sous forme de particules sur une échelle d'une année et en fonction des événements. La surveillance actuelle ne s'intéresse pas à un certain nombre de sources de phosphore, notamment certaines rivières, les dépôts secs, l'évaluation spatiale adéquate des dépôts atmosphériques, les mesures des affluents fondées sur les événements et les concentrations en phosphore dissous. Le manque de données de surveillance des affluents, notamment, compromet la capacité à déterminer la charge en phosphore avec précision.

Incertitudes relatives à la modélisation

La façon dont différents lacs réagissent à la charge en polluants phosphorés provenant des déchets de l'aquaculture est incertaine. Il est probable que les modèles existants surestiment les concentrations de phosphore et la prolifération algale. Il est nécessaire d'élaborer des modèles de prévision, de gestion et d'atténuation des déchets phosphorés produits par l'aquaculture, et d'améliorer ces modèles. L'applicabilité des modèles européens portant sur les lacs dans leur ensemble qui ont expressément intégré l'aquaculture à la prévision de la réaction des écosystèmes lacustres aux charges en polluants phosphorés doit faire l'objet d'une étude au Canada.

Inconnues dans les stratégies d'atténuation

Il est impératif de déterminer et de comprendre la capacité d'assimilation du phosphore des sites aquacoles en eau douce, afin d'être en mesure d'évaluer les effets cumulatifs potentiels associés à l'apport en phosphore émanant l'aquaculture et de déterminer le volume maximal autorisé de production aquacole dans une zone, en prévision de la mauvaise qualité de l'eau ou de l'évolution du réseau trophique.

Il n'est pas possible de déterminer avec certitude si l'emplacement des exploitations d'aquaculture en cage est mieux caractérisé par la classification de type 1 à 3[3] utilisée en Ontario, compte tenu du nombre d'outils limnologiques actuellement disponibles. La détermination des caractéristiques du site, autres que le renouvellement, qui pourraient être prises en compte au cours du processus d'octroi de permis à un site, telles que les concentrations en sulfate, la granulométrie des sédiments et les rapports entre sulfure, fer et phosphate, présente un intérêt.

Si des mécanismes de mise en jachère sont mis en œuvre en tant que stratégie d'atténuation pour lutter contre les effets de la charge en polluants phosphorés, il est nécessaire de mieux comprendre le calendrier d'assainissement du phosphore sur les sites. Étant donné que les déchets produits par l'aquaculture se déposent en grande partie sous les cages et pénètrent par conséquent dans les sédiments, une stratégie de mise en jachère efficace doit s'appuyer sur des connaissances approfondies des délais de rétablissement des sédiments, de l'enfouissement du phosphore et du recyclage.

Il est prévu que les activités d'élevage en cage en eau douce dans les eaux extracôtières deviennent un moyen viable d'expansion de l'industrie au cours des prochaines années, en raison des progrès réalisés en matière d'alimentation à distance et de conception des cages. Principalement en raison de la profondeur plus importante des eaux, il est nécessaire de mieux comprendre comment les déchets particulaires produits par l'aquaculture sont répartis au cours de la sédimentation et comment le potentiel de charge interne en phosphore est susceptible d'évoluer dans les zones extracôtières.

---

[3] D'après Boyd (ministère de l'Environnement de l'Ontario, rapport non publié) : un site de type 1 est un bassin fermé avec un renouvellement limité; un site de type 2 est un site partiellement exposé dont le renouvellement épibenthique/métalimnétique est bon, mais qui bénéficie de peu ou pas d'échanges hypolimniques; un site de type 3 est un endroit exposé où l'ensemble de la colonne d'eau est renouvelée de manière adéquate.

CONCLUSIONS ET AVIS

Importance du phosphore pour l'environnement d'eau douce et, en particulier, pour les écosystèmes canadiens où l'aquaculture en cage est courante

Le phosphore est naturellement présent dans l'environnement, mais rarement sous sa forme élémentaire. Il est naturellement présent à des concentrations variables dans la colonne d'eau des environnements aquatiques d'eau douce, souvent sous la forme de phosphates (PO_4^{-3}, PO_4^{2-}, PO_4^{-}).

Les sources de phosphore approvisionnant les lacs comprennent des sources géologiques (p. ex. l'altération des roches), des sources biologiques (p. ex. les couches de feuilles mortes) et des sources anthropiques (p. ex. les effluents d'eaux usées). La contribution relative des sources naturelles et anthropiques varie considérablement en fonction des caractéristiques du bassin hydrographique.

Le phosphore est un élément nutritif qui limite la croissance des producteurs primaires dans la plupart des lacs, c'est pourquoi la productivité des lacs est liée à la disponibilité en phosphore. Les plans d'eau se caractérisent souvent par leur concentration totale de phosphore : oligotrophe (de 4 à 10 µg par L^{-1}), mésotrophe (de 10 à 30 µg par L^{-1}) et eutrophe (de 30 à100 µg par L^{-1}).

Le phosphate prend différentes formes dans les lacs, aussi bien dans la colonne d'eau que dans les sédiments, et de nombreux facteurs biotiques et abiotiques influencent la répartition et la forme du phosphore dans l'écosystème. La demande biotique élevée en phosphore dans les lacs signifie généralement que le phosphore soluble ne s'accumule pas au fil du temps dans la colonne d'eau, mais qu'il est en fait à peine détectable. Le transport vers les sédiments et l'enfouissement dans les sédiments est le devenir normal de la majeure partie (en général, plus de 80 %) du volume total de phosphore qui pénètre dans un lac.

> *Avis :* Le phosphore a une importance biologique et est d'origine naturelle ainsi qu'anthropique. Le phosphore est naturellement présent à des concentrations faibles, mais variables dans les plans d'eau et tend à limiter la croissance de la production primaire. La concentration de phosphore dans les lacs est étroitement liée aux changements de productivité des lacs et à la qualité de l'eau. La modification anthropique de la charge en polluants phosphorés d'un écosystème lacustre doit par conséquent être prise en compte dans le processus de gestion des activités susceptibles de contribuer à la charge totale en polluants phosphorés.

Afin de prévoir avec précision les effets de l'alimentation en phosphore d'un écosystème lacustre, il est nécessaire de comprendre la façon dont les caractéristiques biotiques (p. ex. la structure du réseau trophique) et abiotiques (p. ex. la chimie des sédiments, la limnologie) de cet écosystème influent sur le cycle du phosphore.

Les changements majeurs qui se sont produits dans les Grands Lacs laurentiens au cours des 30 dernières années en ce qui a trait à la structure du réseau trophique et à la quantité et la nature de la charge en polluants phosphorés ont eu une incidence considérable sur le cycle du phosphore. Ce phénomène s'est traduit par un changement spatial des cycles du phosphore, accompagné par l'accentuation de l'eutrophisation dans de nombreuses zones situées près des rives, ainsi que par une plus grande oligotrophisation des eaux extracôtières.

Au Canada, l'élevage en cage en eau douce est actuellement pratiqué dans des lacs dont la taille, la profondeur, la géologie, l'utilisation du paysage terrestre, les caractéristiques limnologiques, ainsi que d'autres facteurs diffèrent. Ces éléments sont susceptibles d'avoir une incidence sur le cycle du phosphore; cependant, on dispose de peu d'information sur l'importance du phosphore issu de l'aquaculture rejeté dans ces lacs.

> *Avis :* Afin de prévoir précisément et de gérer les effets potentiels des apports en phosphore provenant de l'aquaculture dans les écosystèmes lacustres, il est nécessaire de mieux comprendre les facteurs qui influent sur le cycle du phosphore en fonction de chaque

écosystème. Des travaux supplémentaires doivent notamment être menés pour comprendre les facteurs qui ont une incidence sur le rejet et la rétention du phosphore, et pour comprendre comment la structure du réseau trophique peut influer sur le cycle du phosphore entre la colonne d'eau et les sédiments.

Avis : L'introduction d'espèces envahissantes et la modification de l'utilisation du paysage sont susceptibles d'avoir des répercussions sur le cycle du phosphore d'un écosystème lacustre. La mesure dans laquelle une espèce envahissante peut avoir une influence sur le cycle du phosphore dépend des caractéristiques de l'espèce; par exemple, la moule zébrée a joué un rôle particulièrement important en raison de ses habitudes d'alimentation par filtrage et de ses taux d'infiltration élevés. La modification de l'utilisation du paysage peut modifier considérablement non seulement la charge totale en polluants phosphorés, mais également le rapport entre phosphore dissous et phosphore sous forme de particules. Par conséquent, il est impératif de mettre en place dans les écosystèmes gérés pour accueillir des activités aquacoles une surveillance continue de la charge en polluants phosphorés des bassins hydrographiques et de la modification de la structure trophique, afin de comprendre les charges totales en polluants phosphorés.

Apports en phosphore provenant des fermes d'élevage en cage en eau douce et méthodes d'estimation des apports

La quantité de déchets phosphorés dus aux activités aquacoles dépend principalement de la quantité (concentration) et de la digestibilité des différentes formes de phosphore présentes dans le régime alimentaire. Le phosphore non digéré est excrété sous forme de fèces. La quantité digérée de phosphore qui va au-delà des besoins des poissons est excrétée dans l'urine sous la forme d'orthophosphates et représente la plus grande partie des rejets de phosphore dissous provenant des activités piscicoles.

Le phosphore issu des activités aquacoles d'élevage en cage en eau douce se présente principalement sous la forme de déchets particulaires provenant des fèces et, dans une moindre mesure, de déchets phosphorés dissous provenant de l'urine et des branchies.

- L'excrétion de phosphore par les poissons d'aquaculture est directement liée à la quantité de phosphore dans le régime alimentaire et à sa digestibilité.
- La charge en polluants phosphorés due à l'aquaculture peut être limitée au maximum grâce à l'utilisation d'aliments faibles en phosphore et hautement digestibles.

La concentration en phosphore présente dans les aliments commerciaux pour truite arc-en-ciel utilisés au Canada se situe actuellement entre 0,9 et 1,4 %; la digestibilité du phosphore varie généralement entre 40 et 60 %.

Les déchets alimentaires sont généralement faibles (moins de 1 %) et sont gérés de près par les fermes afin de réduire au minimum les coûts liés à l'alimentation.

L'indice de consommation dépend du stade biologique ou de la taille du poisson, ainsi que des pratiques d'élevage, mais est généralement compris entre 0,8 et 1,6. En règle générale, au cours du cycle de production, l'indice de consommation de la truite arc-en-ciel au Canada varie entre 1,15 et 1,35.

Les modèles nutritionnels constituent la méthode la plus pratique pour estimer avec précision les rejets de phosphore provenant des fermes. Les déchets phosphorés de la truite arc-en-ciel sont actuellement modélisés avec une grande précision à l'aide de modèles tels que FISH-PrFEQ, qui sont fondés sur la connaissance bioénergétique des espèces de poissons et sur la modélisation nutritionnelle.

On estime que les rejets de déchets phosphorés provenant des activités d'élevage de la truite arc-en-ciel au Canada varient entre 3 et 9 kg de phosphore sous forme de particules et entre 4 et 6 kg de phosphore dissous par tonne de biomasse de poisson produit.

Les déchets phosphorés modélisés issus des activités aquacoles constituent une estimation précise de la contribution de phosphore qui n'est pas directement quantifiable en échantillonnant l'eau réceptrice, en raison de la dispersion et des modifications des sédiments (p. ex. l'absorption, la concentration en sédiments et la remise en suspension) susceptibles de se produire.

- La modélisation nutritionnelle des aliments et les données d'élevage fournissent une estimation précise de la contribution du phosphore qui n'est pas quantifiable en échantillonnant l'eau réceptrice, en raison de la dispersion, de la décantation et des transformations rapides des déchets phosphorés une fois introduits dans l'environnement.

  Avis : La gestion des effets potentiels des apports en phosphore liés à l'aquaculture dans les écosystèmes lacustres pourrait être améliorée en utilisant la modélisation nutritionnelle pour caractériser la quantité, la forme et le chronométrage de la charge en polluants phosphorés.

Cycle et devenir des formes chimiques du phosphore dans les environnements d'eau douce

Le lac 375 de la région des lacs expérimentaux montre que la charge en phosphore sous forme de déchets issus de l'aquaculture (p. ex. des fèces particulaires sédimentables) a entraîné une réaction de l'écosystème moins importance qu'une charge de phosphore semblable sous forme soluble dans l'épilimnion des deux autres lacs (L226 et L227) de la région des lacs expérimentaux. Le lac 375 est resté oligotrophe cinq ans après la fin des activités aquacoles, tandis que les lacs 226 et 227 sont devenus eutrophes quelques mois plus tard.

La forme et la synchronisation de la charge en phosphore, ainsi que l'endroit où elle est libérée dans un écosystème lacustre ont une influence sur la réaction de l'écosystème. Par conséquent, on peut supposer que toutes les formes de la charge en phosphore ne posent pas un risque égal.

L'expérience menée dans le lac 375 de la région des lacs expérimentaux fournit le modèle de bilan massique d'un site d'aquaculture d'eau douce le plus précis dont on dispose actuellement. Ce bilan massique montre que la sédimentation est le devenir principal du phosphore (figure 3) et que par conséquent, une grande partie des rejets de phosphore des fermes quittent la colonne d'eau. Les rejets phosphorés totaux ne permettent pas de mesurer avec exactitude l'impact potentiel d'une ferme sur la qualité de l'eau.

En 2006, l'aquaculture a contribué à environ 5 % de la charge totale en phosphore du chenal du Nord. Il s'agissait d'une année de faibles précipitations. Par conséquent, la contribution de l'aquaculture à la charge totale est proportionnellement plus élevée.

Les années humides, le chenal du Nord peut dépasser les charges cibles de phosphore établies par la CMI; toutefois, le manque de données utilisées pour calculer la charge en polluants phosphorés apporte un degré d'incertitude à cette conclusion.

- La charge totale en phosphore produite par les élevages ne représente pas une mesure exacte du risque d'eutrophisation potentiel posé par l'apport en phosphore dans un écosystème. Le chronométrage et le devenir de la charge en polluants phosphorés peuvent avoir une influence considérable sur ce risque.

  Avis : Des différences de limnologie, de géochimie et de structure trophique propres à un écosystème peuvent modifier le cycle du phosphore. Il est donc nécessaire de mener des recherches scientifiques supplémentaires pour déterminer le devenir du phosphore provenant de l'aquaculture dans les écosystèmes accueillant des activités commerciales d'élevage en cage.

Avis : Le faible niveau de surveillance des apports en phosphore des affluents constitue une source importante d'incertitude au moment d'estimer les charges totales en polluants phosphorés du chenal du Nord. Il est impératif d'améliorer considérablement la surveillance spatiale des sources en phosphore des écosystèmes gérés destinés à accueillir des activités aquacoles. L'estimation précise de la charge en polluants phosphorés est nécessaire pour déterminer les bilans de phosphore.

Avis : La variabilité naturelle des précipitations annuelles peut avoir une incidence considérable sur la charge en polluants phosphorés des bassins versants alimentant les écosystèmes lacustres. Il serait souhaitable de gérer l'ensemble des charges anthropiques en polluants phosphorés de manière à tenir compte de la variation naturelle de la charge des bassins versants, tout en empêchant la détérioration de la qualité de l'eau.

Avis : Bien que l'industrie aquacole contribue actuellement à seulement 5 % environ de la charge en polluants phosphorés du chenal du Nord, l'importance biologique du phosphore pour la productivité lacustre et la nécessité de satisfaire aux charges en polluants phosphorés cibles de la CMI laissent entendre que la charge en polluants phosphorés doit être prise en considération dans la gestion de l'expansion prévue de l'industrie ou d'autres activités dont la contribution à la charge en polluants phosphorés est reconnue.

Avis : L'établissement de charges cibles en polluants phosphorés pourrait être amélioré si les réactions sublittorales et extracôtières à ces charges étaient prises en compte, et si le type des charges, c'est-à-dire si elles prennent la forme de particules ou de phosphore dissous, était pris en considération. L'établissement de seuils de charges distincts pour les zones sublittorales et extracôtières, ainsi que pour le phosphore dissous et sous forme de particules permettrait d'améliorer la gestion de l'écosystème du chenal du Nord.

Avis : La mise en place d'une stratégie de gestion des bassins versants qui tiendrait compte non seulement de l'aquaculture, mais également d'autres activités au sein des bassins versants et de leur contribution potentielle aux charges en polluants phosphorés, serait bénéfique pour tous les intervenants.

Dans les eaux réceptrices, les déchets phosphorés dissous sont dilués et rapidement assimilés dans la chaîne alimentaire. Les programmes de surveillance des fermes du lac Huron ne détectent habituellement pas l'augmentation du phosphore total dans la colonne d'eau.

Le fait que le phosphore dissous contribue ou non à la croissance d'algues nuisibles dépend en grande partie de la quantité et de la forme du phosphore apporté, de la disponibilité d'autres éléments nutritifs essentiels, de l'endroit où le phosphore est rejeté et des caractéristiques du réseau trophique et du plan d'eau.

Les déchets phosphorés particulaires, qui se trouvent principalement à l'état de fèces, se déposent rapidement sur les sédiments. La profondeur de l'eau influe sur la distribution et la transformation des déchets particulaires (c'est-à-dire consommés par les poissons sauvages ou lessivés) à mesure qu'ils se déposent. La surveillance de sites canadiens présentant des conditions hydrodynamiques a permis d'observer que les déjections des poissons n'étaient pas largement répandues, mais qu'elles s'accumulaient sous les cages.

Les modèles de bilan massique ont montré qu'une partie importante des déchets phosphorés (dissous ou sous forme de particules) des lacs tempérés finissent piégés dans les sédiments. Dans la région des lacs expérimentaux, un volume supérieur ou égal à 85 % du phosphore issu de l'aquaculture était séquestré dans les sédiments.

Avis : Une grande partie des déchets de phosphore (dissous ou sous forme de particules) rejetés dans un lac tempéré par des activités aquacoles est piégée dans les sédiments, comme dans le cas des apports « naturels » en phosphore des affluents. Par conséquent, la charge

totale en polluants phosphorés ne constitue pas nécessairement un indicateur précis du potentiel d'eutrophisation de la charge en phosphore. C'est la quantité de phosphore qui reste dans la colonne d'eau et qui est libérée des sédiments qui doit être prise en compte.

Le phosphore présent dans les sédiments se divise en différents fractionnements, par exemple, le phosphore lié au fer, à l'aluminium ou au calcium.

Dans de bonnes conditions, certains fractionnements du phosphore dans les sédiments deviennent solubles et peuvent rejoindre le réseau trophique. C'est ce que l'on appelle une charge interne en phosphore. La mobilisation la mieux comprise est la libération de phosphore lié au fer dans des conditions d'anoxie. Certains fractionnements sont essentiellement immobiles, car les conditions nécessaires pour mobiliser le phosphore sous cette forme sont très peu susceptibles de se produire ou le taux de mobilisation est extrêmement faible.

Les techniques de fractionnement du phosphore sous forme de particules peuvent être utilisées pour comprendre la fixation du phosphore dans les sédiments et ainsi mieux appréhender la possibilité de libération de phosphore dissous présent dans les sédiments.

Il existe peu de données provenant de l'analyse de fractionnement du phosphore pour les deux sites d'élevage commercial de truite arc-en-ciel du lac Huron. Le fractionnement du phosphore sous forme de particules dans les sédiments se trouvant sous les cages diffère de la composition en phosphore du site de référence (tableau 2). Par exemple, du phosphore lié au calcium, notamment des arêtes trouvées dans la nourriture pour poissons, a été observé dans des concentrations plus élevées sous les cages que sur les sites de référence. Le phosphore lié au calcium est moins mobile et se libère seulement dans des conditions acides.

- Malgré leur nombre restreint, il existe toutefois des données indiquant que les formes de phosphore présentes dans les sédiments sous les cages à poisson et autour de celles-ci ont des quantités relatives différentes de celles mesurées dans les sédiments de sites de référence.
- La forme du phosphore ainsi que sa quantité doivent être comprises pour caractériser correctement le potentiel de remobilisation et, par conséquent, de développement d'une charge interne. Les charges internes en phosphore libèrent le phosphore qui était piégé dans les sédiments et le rendent biodisponible. Ce phénomène de libération n'est pas souhaitable, car il accroît la proportion de la charge en phosphore qui contribue à l'eutrophisation.

  Avis : D'autres échantillonnages du fractionnement du phosphore sur des sites d'aquaculture commerciale en cage et des sites de référence, ainsi que les mesures des rejets de phosphore par les sédiments (le phosphore devient par exemple soluble), permettraient de mieux caractériser le risque d'eutrophisation que pose cette accumulation de phosphore dans les sédiments.

Méthodes de prévision, de gestion et d'atténuation des effets du phosphore émanant de l'aquaculture en cage dans les environnements d'eau douce (p. ex. l'eau, les sédiments, le biote)

Des outils de modélisation de différents niveaux de complexité pourraient être utilisés pour prédire et gérer les impacts liés à l'apport en phosphore dans les systèmes d'aquaculture d'eau douce : l'applicabilité de ces modèles aux eaux canadiennes n'a pas été mise à l'essai.

Avis : L'utilisation de modèles européens prenant spécifiquement en compte l'aquaculture dans la prédiction de la réaction de l'ensemble de l'écosystème lacustre aux charges en polluants phosphorés permettrait peut-être d'améliorer la gestion des effets cumulatifs de l'aquaculture en eau douce au Canada.

Avis : Ces modèles doivent être adaptés aux écosystèmes canadiens, car la structure du réseau trophique et la chimie des sédiments peuvent différer.

Les stratégies nutritionnelles offrent un moyen direct de gérer et d'atténuer les rejets de déchets phosphorés émanant de la pisciculture.

La modification de la composition des aliments pour améliorer la digestibilité et répondre au plus près aux besoins alimentaires s'avère être un moyen efficace de réduire les déchets phosphorés émanant de la pisciculture.

Ces formulations alimentaires à faible teneur en phosphore sont largement utilisées dans l'industrie commerciale de l'aquaculture en cage.

En Ontario, des exigences en matière d'octroi de permis imposant une teneur limite en phosphore dans les aliments et des quotas alimentaires annuels (volume de nourriture qu'une ferme peut utiliser) se sont avérées efficaces pour atténuer les rejets de phosphore provenant des fermes.

Des mesures alimentaires supplémentaires pourraient se concentrer sur l'amélioration de l'efficacité d'utilisation, de manière à réduire la consommation d'aliments et les déchets.

> *Avis :* La mise en place de stratégies nutritionnelles peut être un moyen direct et efficace de gérer les rejets de phosphore provenant de la pisciculture.
>
> *Avis :* L'élaboration d'une nourriture plus efficacement utilisée par les poissons pourrait permettre de réduire l'utilisation de l'alimentation et les déchets produits.

- En Ontario, des exigences en matière d'octroi de permis imposant des quotas alimentaires et l'utilisation d'aliments à faible teneur en phosphore se sont avérées efficaces pour atténuer le potentiel d'eutrophisation attribuable aux polluants phosphorés provenant des activités de pisciculture.

La sélection appropriée de l'emplacement des activités aquacoles est la méthode actuellement utilisée pour atténuer les risques liés à la charge en polluants phosphorés. En Ontario, le processus de délivrance de permis restreint l'installation aux zones où le renouvellement hypolimnique est suffisant, afin de limiter la probabilité d'anoxie et, par conséquent, les charges internes en phosphore.

Le déplacement des cages au large et la mise en jachère dans les zones sublittorales sont des stratégies potentielles d'atténuation des risques liés à la charge en polluants phosphorés. Toutefois, aucune donnée scientifique ne vient appuyer la mise en œuvre de cet avis.

La surveillance environnementale continue de sites aquacoles d'eau douce déterminés permet de veiller à ce que les répercussions sur l'environnement soient signalées. En Ontario et en Saskatchewan, les conditions de permis exigent la surveillance continue de la concentration totale de phosphore, de la concentration d'O_2 dissous et de la qualité des sédiments. Les répercussions négatives donnent lieu à une exigence de surveillance supplémentaire et même, dans certains cas, à l'obligation de réduire les quotas alimentaires.

- Des exigences relatives à l'installation de cages à des emplacements qui minimisent le potentiel de développement de charges internes en polluants phosphorés (p. ex. les sites où un renouvellement suffisant se produit) et des contrôles environnementaux réguliers sont actuellement utilisés pour atténuer les risques liés à la charge en polluants phosphorés.

  Avis : Des critères de sélection des sites supplémentaires, comme la mise en jachère ou l'installation dans des zones extracôtières, devraient être élaborés afin d'atténuer davantage les risques liés à la charge en polluants phosphorés émanant de l'aquaculture dans les régions côtières d'eau douce. Actuellement, l'aquaculture en cage en eau douce ne pratique pas la mise en jachère. Le déplacement des activités vers des zones extracôtières permettrait de bénéficier de charges cibles en polluants phosphorés plus élevées et d'une plus grande dispersion des déchets due à la profondeur plus importante des eaux.

Évaluation des risques de l'apport en phosphore émanant de l'industrie de l'aquaculture en cage pour les environnements d'eau douce du Canada

Cet examen ne fournit pas une évaluation officielle du risque, mais caractérise plutôt certains risques liés aux apports en phosphore provenant de l'aquaculture d'eau douce.

Compte tenu des niveaux de production industrielle et des pratiques actuelles, la probabilité que les apports en phosphore provenant de l'aquaculture en cage entraînent l'eutrophisation des environnements d'eau douce canadiens peut généralement être caractérisée comme étant « faible ». En Ontario, la réglementation permet la régularisation de l'industrie, et les ententes de surveillance offrent aux organismes provinciaux le moyen de repérer les cas de non-conformité. Les mesures d'atténuation actuelles comprennent la surveillance de la qualité de l'eau et des sédiments, l'imposition d'une teneur maximale en phosphore dans les aliments, l'utilisation de quotas alimentaires et l'imposition de critères de sélection des sites.

Bien que l'industrie de l'aquaculture en cage en eau douce dans le lac Huron soit actuellement durable, la croissance de l'industrie (ou le développement de toute activité contribuant à la charge en polluants phosphorés) exige la prise en compte de la quantité totale de phosphore (provenant de toutes les sources et non pas uniquement de l'aquaculture) et de l'emplacement, afin de ne pas dépasser les charges totales limites dans le secteur.

- Compte tenu des niveaux de production industrielle et des pratiques actuelles, la probabilité que les apports en phosphore provenant de l'aquaculture en cage entraînent l'eutrophisation des environnements d'eau douce canadiens peut généralement être caractérisée comme étant « faible ».

  Avis : La croissance à venir de l'industrie ou le développement de toute autre activité anthropique contribuant à la charge en polluants phosphorés exige de prêter une attention particulière aux apports en phosphore, quelle qu'en soit la source.

Dans les conditions environnementales actuelles, les préoccupations liées aux concentrations en phosphore dans les Grands Lacs sont géographiquement hétérogènes. Dans les zones sublittorales, il est impératif d'atténuer les charges en polluants phosphorés, en raison de la présence de salissures algales sur la ligne de côte, tandis que dans les eaux extracôtières, la charge en polluants phosphorés est moins préoccupante.

La CMI revoit actuellement ses charges cibles en phosphore (actuellement à 520 tonnes métriques par an dans le chenal du Nord); elle inclura les zones sublittorales et extracôtières et établira également des cibles différentes pour le phosphore dissous et le phosphore sous forme de particules. On prévoit que la redistribution des charges de phosphore cibles se traduise par la détermination de zones préoccupantes sur le littoral, pour lesquelles des charges cibles en phosphore (notamment de phosphore dissous) plus faibles seront établies, et par l'établissement de charges cibles en phosphore potentiellement plus élevées dans les eaux extracôtières.

- Il est prévu que les charges établies par la CMI fassent la distinction entre le phosphore dissous et le phosphore sous forme de particules et soient différentes pour les zones sublittorales et côtières (c.-à-d. la répartition spatiale des charges en phosphore). La gestion de la croissance future de l'industrie devrait allier modélisation nutritionnelle et modélisation du lac entier, afin de fournir des estimations précises des apports en phosphore ainsi que des critères de sélection des sites optimaux pour mieux atteindre les charges spatiales cibles.

AUTRES CONSIDÉRATIONS

Les rejets de phosphore, de carbone et d'azote dans les déchets aquacoles sont intrinsèquement liés. Le fait que cette étude porte sur le phosphore était dû à la nature de la demande du Secrétariat canadien de consultation scientifique et n'avait pas pour objectif de laisser entendre que la seule

préoccupation associée aux rejets de déchets était la charge en polluants phosphorés. Les déchets aquacoles contiennent non seulement du phosphore, mais apportent également une teneur importante en azote et en carbone aux eaux réceptrices. Le carbone organique, par exemple, peut modifier considérablement les habitats benthiques et réduire les concentrations d'oxygène dissous dans les sédiments. La colonne d'eau surjacente et les différentes séquences des effets doivent être prises en compte dans la gestion et l'atténuation des risques potentiels pour les écosystèmes aquatiques.

SOURCES DE RENSEIGNEMENTS

Le présent avis scientifique découle de la réunion régionale d'examen par des pairs qui s'est déroulée du 17 au 19 juin 2014 et intitulée Aquaculture en cage en eau douce : impacts écosystémiques des déchets de phosphore dissous et sous forme de particules. Toute autre publication découlant de cette réunion sera publiée, lorsqu'elle sera disponible, sur le calendrier des avis scientifiques de Pêches et Océans Canada (MPO).

Andrieux, F., and Aminot, A. 1997. A two-year survey of phosphorus speciation in the sediments of the Bay of Seine (France). Cont. Shelf Res. 17: 1229–1245.

Bai, X., Wang, J., Schwab, D.J., Yang, Y., Luo, L., Leshkevich, G.A., and Liu, S. 2013. Modeling 1993–2008 climatology of seasonal general circulation and thermal structure in the Great Lakes using Fvcom. Ocean Model. 65: 40–63.

Bristow, C.E., Morin, A., Hesslein, R.H., and Podemski, C.L. 2008. Phosphorus budget and productivity of an experimental lake during the initial three years of cage aquaculture. Can. J. Fish. Aquat. Sci. 65: 2485–2495.

Bureau, D.P., Gunther, S., and Cho, C.Y. 2003. Chemical composition and preliminary theoretical estimates of waste outputs of rainbow trout reared on commercial cage culture operations in Ontario. N. Am. J. Aquacult. 65: 33–38.

Cho, C.Y., and. Bureau, D.P. 1997. Reduction of waste output from salmonid aquaculture through feeds and feedings. Prog. Fish-Cult. 59: 155–160.

Cho, C.Y., and Bureau, D.P. 1998. Development of bioenergetic models and the Fish-PrFEQ software to estimate production, feeding ration and waste output in aquaculture. Aquat. Living Resour. 11: 199–210.

Cho, C.Y., Hynes, J.D., Wood, K.R., and Yoshida, H.K. 1994. Development of high-nutrient-dense, low-pollution diets and prediction of aquaculture wastes using biological approaches. Aquaculture 124: 293–305.

Commission mixte international (CMI). 2012. Accord sur la qualité de l'eau dans les Grands Lacs - 2012. Commission mixte internationale de Canada et les États-Unis d'Amérique.

Dolan, D.M., and Chapra, S.C. 2012. Great Lakes total phosphorus revisited: 1. Loading analysis and update (1994-2008). J. Great Lakes Res. 38: 730–740.

Gale, P. 1999. Water quality impacts from aquaculture cage operations in the LaCloche/North Channel of Lake Huron. *In* Addressing concerns for water quality impacts from large-scale Great Lakes aquaculture. Great Lakes Fishery Commission (Habitat Advisory Board) and the International Joint Commission (Great Lakes Water Quality Board), Windsor, Ont. p. 9.

Håkanson, L. 2005. Changes to lake ecosystem structure resulting from fish cage farm emissions. Lake Reserv. Res. Manage. 10: 71–80.

Håkanson, L., and Carlsson, L. 1998. Fish farming in lakes and acceptable total phosphorus loads: Calibrations, simulations and predictions using the LEEDS model in Lake Southern Bullaren, Sweden. Aquat. Ecosyst. Health Manag. 1: 1–24.

Hua, K., de Lange, C.F.M., Niimi, A.J., Cole, G., Moccia, R.D., Fan, M.Z., and Bureau, D.P. 2008. A factorial model to predict phosphorus waste output from salmonid fish production. Aquacult. Res. 39: 1059–1068.

Joosse, P.J., and Baker, D.B. 2011. Context for re-evaluating agricultural source phosphorus loadings to the Great Lakes. Can. J. Soil Sci. 91: 317–327.

LaBeau, M.B., Robertson, D.M., Mayer, A.S., Pijanowski, B.C., and Saad, D.A. 2014. Effects of future urban and biofuel crop expansions on the riverine export of phosphorus to the Laurentian Great Lakes. Ecol. Model. 277: 27–37.

Li, B., and Brett, M.T. 2013. The influence of dissolved phosphorus molecular form on recalcitrance and bioavailbility. Environ. Pollut. 182: 37–44.

Michalak, A.M., Anderson, E.J., Beletsky, D., Boland, S., Bosch, N.S., Bridgeman, T.B., Chaffin, J.D., Cho, K., Confesor, R., and Daloğlu, I. 2013. Record-setting algal bloom in Lake Erie caused by agricultural and meteorological trends consistent with expected future conditions. Proc. Natl. Acad. Sci. 110: 6448–6452.

Milne, J.E. 2012. Monitoring and modeling total phosphorus contributions to a freshwater lake with cage-aquaculture. Thesis (M.Sc.), University of Guelph. Guelph, ON.

Moccia, R.D., and Bevan, D. 2007. AQUASTATS 2006, Ontario Aquaculture Production in 2006. Aquaculture Center, University of Guelph, Guelph, ON.

Sonzogni, W.C., Chapra, S.C., Armstrong, D.E., and Logan, T.J. 1982 Bioavailability of phosphorus inputs to lakes. J. Environ. Qual. 11: 555–562.

Williams, J.D.H., Shear, H., and Thomas, R.L. 1980. Availability to *Scenedesmus quadricauda* of different forms of phosphorus in sedimentary materials from the Great Lakes. Limnol. Oceanogr. 25: 1–11.

Zhao, J., Rao, Y.R., and Sheng, J. 2012. Numerical study of dispersion and hydrodynamic connectivity of near-surface waters in Lake Huron. Water Qual. Res. J. Can. 47: 238–251.

CE RAPPORT EST DISPONIBLE AUPRÈS DU :

Région du Centre et de l'Arctique
Pêches et Océans Canada
501 University Crescent
Winnipeg (Manitoba) R3T 2N6

Téléphone : (204) 983-5131
Courriel : xcna-csa-cas@dfo-mpo.gc.ca
Adresse Internet : www.dfo-mpo.gc.ca/csas-sccs/

ISSN 1919-5117
© Sa Majesté la Reine du chef du Canada, 2015

La présente publication doit être citée comme suit :

MPO. 2015. Aquaculture en cage en eau douce : impacts écosystémiques des déchets de phosphore dissous et sous forme de particules. Secr. can. de consult. sci. du MPO, Avis sci. 2015/051.

Also available in English:

DFO. 2015. Freshwater cage aquaculture: ecosystems impacts from dissolved and particulate waste phosphorus. DFO Can. Sci. Advis. Sec. Sci. Advis. Rep. 2015/051.